日本機械学会論文集(B編)
53巻492号(昭62-8)

論文 No. 86-1236 A

液封式真空ポンプの研究*
(第2報, 理論解析)

藤田　優*[1], 岡崎卓郎*[1]

A Study of Water Ring Vacuum Pumps
(2nd Report, Theoretical Analysis)

Masaru FUJITA and Takuro OKAZAKI

A theorical analysis of operating characteristics of water ring vacuum pumps was carried out. It is so called abnormal operation if the gas passes through the impeller channel and goes out to the peripheral space. The limiting condition of this operation was calculated. It could be concluded that the gas quantity carried over from the discharge to suction process is determined by the pressure ratio and the sealing water supply.

Key Words: Fluid Machine, Vacuum Pump, Water Ring Pump, Liquid Ring Pump

1. まえがき

液封式真空ポンプの理論的研究は数少ないし，まだ明らかにされていないことも数多くある．第1報[1]ではPfleidererの理論[2]について検討したが，本報では明らかにされていない理論のうち，特に圧縮および吐出し過程で異常現象が起こる条件を計算により求めた．また，吐出し終わりより吸込み始めに繰り越される羽根間通路の気体（以下キャリー・オーバと呼ぶ）と吐出し口への封液のもれ量がどういう影響を与えるか計算により求めた．すきまからのもれ，蒸発，飛び散り，キャビテーションによる損失は別問題とする．

計算例の寸法は実在のものに近い数値を使用した．この計算例ではとくにPfleidererの理論の中でいっているDrehschnelle ($\varepsilon=\rho_w U^2/2p_s$) が重要な役割をしている．計算を簡単にするため二次元的に取り扱い，羽根幅（軸方向）は単位長さとし，羽根のピッチは無限小とし，三日月通路（羽根外半径と偏心したケーシング内壁で囲まれた三日月形をした封液の通路）の中と羽根間通路の封液の流れは一次元的に取扱う．もちろん曲線にそって一次元的に取扱うことは許されていることであるし，それによって結果に差支えることはないし，結果が本質的に変わるということはない．一次元的に取扱えば，本報の主目的とする異常現象の解明において，計算が簡単で見通しがきき本質的な違いを明らかにしやすい．羽根間通路の気体は等温変化[3]するものとする．なお，異常現象とは本報では圧縮および吐出し過程で羽根間通路の気体が三日月通路に飛込む現象をいう．この現象の具体的な例は，結果の図2 ($p_d/p_s=4.70$ の曲線) がそうである．

2. 記　号

2·1 三日月通路

c：三日月通路の周方向の封液の速度（深さ方向に一定とする）

c_{r+}：羽根から三日月通路に出たすぐの封液の速度の半径方向成分

c_+：羽根から三日月通路に出たすぐの封液の速度の周方向成分

l_b：三日月通路の深さで，$l_b=l_2(1-x^2/\phi^2)$ とする．

l_2：三日月通路の深さが最大となるところ

p_{a+}：羽根から三日月通路に出たすぐの封液の静圧

---

* 昭和62年4月1日　第64期通常総会講演会において講演，原稿受付　昭和61年10月8日．

*[1] 正員，日本大学生産工学部（〒275 習志野市泉町1-2-1）．

x：羽根車外半径周方向長さ（三日月通路の始まりで $x=-\phi$,終わりで $x=\phi$ とする。）

2・2　羽根車

d_c：羽根間通路の羽根に直角にはかった幅（本報では無限枚数の羽根を仮定しているため零になるが，この d_c は実在の例のものを使う）

p_a：羽根間通路内の気体圧力

p_d：吐出し圧力

p_{a-}：羽根間通路先端の静圧（三日月通路より羽根間通路に入ったすぐの所）

p_s：吸込み圧力

q_L：封液のもれ量（羽根内半径より吐出し口へ）

r：半径

r_a：羽根外半径

r_x：気液界面の半径

r_i：羽根内半径

s：羽根根元からはかった羽根にそう長さ

U：周速度　$=\omega r_a$

w：羽根間通路の羽根にそった方向の封液の相対速度で計算を簡単にするため w が羽根にそって一定になるように羽根の傾きを決めたが，これは実物にかなり近く，d_c は r に無関係になる。

w_r：羽根間通路の封液の相対速度の半径方向成分

β：羽根の厚みの割合で半径方向に一定の場合について考えた。（羽根の厚み $=\beta d_c$）

θ_a：羽根先端の接線と半径方向のなす角

λ_R：吸込み空気量

ρ_a：気体の密度

ρ_w：液体の密度（封液）

ω：角速度

2・3　添　字

a：外半径および羽根間通路先端でその外と内を区別する必要がある時は外を＋，内を－とする。

$a+$：羽根間通路より三日月通路へ出たすぐの所

$a-$：三日月通路より羽根間通路へ入ったすぐの所

i：内半径

r：半径方向成分

s：羽根にそった方向成分

w：液体（封液）

x：気液界面

1：吸込み始め

2：吸込み終わり（圧縮始め）

3：圧縮終わり（吐出し始め）

4：もれ始め（ない場合もある）

5：もれ終わり（ない場合もある）

6：吐出し終わり

2・4　摩擦係数

c_{fe}：羽根外周の摩擦係数

c_{fw}：三日月通路の壁面摩擦係数

λ_c：羽根管通路の管摩擦係数で水力平均深さは $1/2d_c$

2・5　損失係数

$\zeta_{/\!/}$：三日月通路から羽根にそった方向に羽根間通路に封液が入る場合の損失係数

$\zeta_{\perp}$：三日月通路から羽根に直角方向に羽根間通路に封液が入る場合の損失係数

2・6　キャリー・オーバ　キャリー・オーバ率を吸込み始めと，吸込み終わりの空気量で表すと

$$\text{キャリー・オーバ率}=\frac{r_{x1}^2-r_i^2}{r_{x2}^2-r_i^2}\times 100(\%)$$

結果の図中では c・o・f と略記する．r_{x1} は吸込み始め，r_{x2} は吸込み終わりの r_x の値である．

3.　基礎方程式

図1は2口型の封液式真空ポンプの断面図で，上下対称の構造であるので上半分のみを示す．

3・1　羽根間通路　羽根の厚みの周方向割合が一定であるので連続の条件より

$$w_r r=w_{rx}r_x=w_{ra}r_a=\text{const} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

羽根の傾きは

$$\frac{ds}{dr}=\frac{w}{w_r}=\frac{wr}{w_r r}=\frac{w_a}{w_{ra}r_a}r$$

$$\therefore s=\frac{w_a}{2w_{ra}r_a}(r^2-r_i^2)$$

$$=\frac{\sec\theta_a}{2r_a}(r^2-r_i^2) \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

w が羽根にそって一定とすれば式(2)を満足し，また羽根の傾きが式(2)で表されれば w は羽根にそって一定となる．

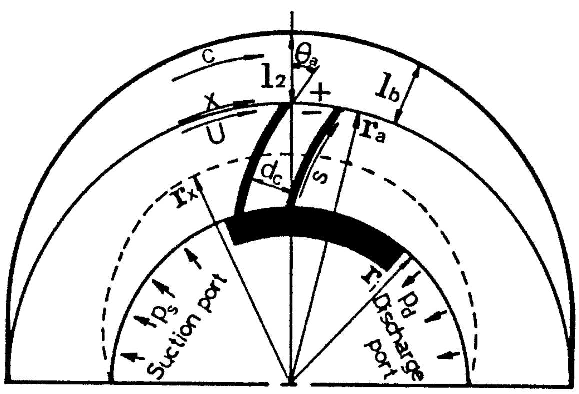


図1　液封式真空ポンプ断面

w_{rx} については

$$w_{rx}=\frac{r_a}{r_x}w_{ra}=\left[\frac{\partial r_x}{\partial t}\right]_{\rm rot}=U\left[\frac{\partial r_x}{\partial x}\right]_{\rm static} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

となる．rot：回転座標，static：静止座標，一つの羽根間通路についてはその外径の x と s および t によって表せるものとしている．羽根に相対的な座標系で s 方向の運動方程式を作ると

$$\frac{\partial w}{\partial t}+w\frac{\partial w}{\partial s}+\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial p}{\partial s}-r\omega^2\frac{\partial r}{\partial s}+\frac{\lambda_c}{4d_c}w|w|=0 \quad \cdots\cdots(4)$$

絶対座標系で表すと定常となり $(\partial/\partial t)$ を $U(\partial/\partial x)$ で置き換えればよく，さらに s で積分すると

$$\left[U\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\lambda_c}{4d_c}w|w|\right](s_a-s_x)+\left[\frac{p}{\rho_w}-\frac{1}{2}r^2\omega^2\right]_x^a=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

以上式(2)，(5)より

$$U^2\sec^2\theta_a\frac{r_a^2-r_x^2}{2r_a^2}\frac{\partial}{\partial x}\left(r_x\frac{\partial r_x}{\partial x}\right)+\frac{p_{a-}-p_a}{\rho_w}+\frac{\lambda_c}{8d_c}\sec^3\theta_a\frac{U^2}{r_a^3}r_x^2\frac{\partial r_x}{\partial x}\left|\frac{\partial r_x}{\partial x}\right|(r_a^2-r_x^2)-\frac{1}{2}\omega^2(r_a^2-r_x^2)=0 \quad \cdots\cdots(6)$$

3·2 三日月通路 連続の条件より

$$\frac{\partial}{\partial x}(cl_b)=c_{r+} \quad \cdots\cdots(7)$$

$$[c_{r+}=w_{ra}(1-\beta)]$$

運動量保存の法則から，羽根間通路より三日月通路へ封液が出てゆく場合は，羽根間通路の速度成分がきくので

$$\frac{\partial}{\partial x}(c^2l_b)=c_+\frac{\partial}{\partial x}(cl_b)-\frac{l_b}{\rho_w}\frac{\partial p_{a+}}{\partial x}-\frac{c_{fw}}{2}c|c|+\frac{c_{fe}}{2}(U-c)|U-c| \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

角超過を考慮してすべり率を0.9とすると c_+ は

$$c_+=0.9U+w_a\sin\theta_a=0.9U+w_{ra}\tan\theta_a$$

三日月通路より羽根間通路に封液が入る場合は，三日月通路の速度成分がきくので式(8)の右辺第1項の c_+ だけを c に置き換えればよく，置き換えると

$$\frac{\partial}{\partial x}(c^2l_b)=c\frac{\partial}{\partial x}(cl_b)-\frac{l_b}{\rho_w}\frac{\partial p_{a+}}{\partial x}-\frac{c_{fw}}{2}c|c|+\frac{c_{fe}}{2}(U-c)|U-c| \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

となる．三日月通路の x 方向の封液の流量は式(3)と式(7)より

$$cl_b=(1-\beta)\frac{U}{r_a}\frac{r_x^2-r_{x1}^2}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

式(10)は $-\phi<x<\phi$ の範囲で羽根内半径より内側へ封液がもれるまでは必ず成り立つ．

3·3 羽根間通路出口と三日月通路の圧力差 羽根間通路より三日月通路へ封液が出る場合 $\{(\partial r_x/\partial x)>0$, したがって $(\partial/\partial x)(cl_b)>0\}$ は，運動量の法則より

$$\frac{p_{a+}-p_{a-}}{\rho_w}=c_{r+}(w_{ra}-c_{r+})=\beta(1-\beta)w_{ra}^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

三日月通路より羽根間通路へ封液が入る場合 $\{(\partial r_x/x)<0$, したがって $(\partial/\partial x)(cl_b)<0\}$ は，封液が羽根間通路に入る直前で羽根先端に衝突するため，その圧力差はエネルギーの式で表すと

$$\frac{p_{a+}-p_{a-}}{\rho_w}=\frac{1}{2}[w_{ra}^2\sec^2\theta_a-(c-U)^2-c_{r+}^2+\zeta_{/\!/}\{(U-c)\sin\theta_a-c_{r+}\cos\theta_a\}^2+\zeta_{\perp}\{(U-c)\cos\theta_a+c_{r+}\sin\theta_a\}^2] \quad \cdots\cdots(12)$$

式(12)で三日月通路より羽根間通路へ封液が入る時に損失があるがその損失は方向によって異なるので，単位長さ当たり羽根にそった s 方向の損失は右辺第4項，それに直角な方向の損失は右辺第5項のように表した．

3·4 羽根間通路の気体圧力

3·4·1 吸込み過程 $(-\phi<x<x_2)$

$$p_a=p_s \quad \cdots\cdots(13)$$

$$[p_s/(\rho_wU^2)=1/(2\varepsilon)]$$

3·4·2 圧縮過程 $(x_2<x<x_3)$ 羽根間通路の気体は等温変化[3]すると仮定して

$$p_a(r_x^2-r_i^2)=p_s(r_{x2}^2-r_i^2) \quad \cdots\cdots(14)$$

3·4·3 吐出し過程 $(x_3<x<\phi)$

$$p_s=p_d \quad \cdots\cdots(15)$$

4. 各過程の式と境界条件

4·1 計算式 式(1)から式(15)までで x についての r_x の3階非線形常微分方程式となる．基本的には羽根間通路から三日月通路へ封液が出てゆく場合 $(\partial r_x/\partial x>0)$ と，三日月通路より羽根間通路へ封液が入る場合 $(\partial r/\partial x<0)$ に分けて考えればよい．すなわち $\partial r_x/\partial x>0$ の場合は式(6)，(8)，(11)を用い，$\partial r_x/\partial x<0$ の場合は式(6)，(9)，(12)を用いればよい．以上の式を無次元化し電算機でR·K·G法により計算した．損失係数やすべり率についてはいろいろな数値を与えて計算しその一例を示したが，数値をどのようにとっても結論には本質的には影響しない．

4·2 境界条件 吸込み始めの初期条件は r_x/r_a が吐出し終わりよりキャリー・オーバされたままである．$\partial r/\partial x, \partial^2r_x/\partial x^2$ は零からある有限の値に変わる．これは吸込み始めで $\partial p_{a+}/\partial x, p_{a+}=p_{d+}(1/2)\rho_w\omega^2\times(r_a^2$

$-r_i^2$)そして p_a が p_s に変わるということから導くことができる. 吸込み過程において p_a は式(13)より求まる. 吸込みより圧縮過程に移る際は $p_{a+}-p_a, r_x/r_a$, $\partial r_x/\partial x$ が連続で p_a は式(13)より式(14)に変わる. 圧縮より吐出し過程に移る際には $p_{a+}, r_x/r_a$, $\partial r_x/\partial x$ が連続で, p_a は式(14)より式(15)に変わる. 各過程で $\partial r_x/\partial x$ の符号が変わることがあるがその場合は $p_{a+}-p_a, r_x/r_a, \partial r_x/\partial x$ を連続とすればよい. これらよりそれぞれの場合について $\partial^2 r_x/\partial x^2$ の不連続的変化量が計算できる. 以上の境界条件を考慮して吸込み始めより吐出し終わりまでの気液界面の形状を計算する. 計算に使用した数値例を記述しておく. $d_c/\phi=0.17, r_a/\phi=0.64, \phi/l_2=6.57, r_a/l_2=4.18, \beta=0.14, \theta_a=0.937$(rad), $r_i/r_a=0.59$

5. 気液界面の形状

気液界面の形状を求める計算の基本的な考え方は4・1節で述べたが, まず羽根間通路から三日月通路へ封液が出てゆく場合について考えると, 式(6)を p_{a-} について整理し, これを式(11)の p_{a-} に代入する. そしてこの式を p_{a+} について整理し, 式(8)に代入して一つの式に整理する. この式を無次元化して計算する. 次に三日月通路より羽根間通路へ封液が入る場合について考えると, 先程の式(11)を式(12), (8)を式(9)に置き換え, それぞれ p_{a-}, p_{a+} について整理して一つの式にまとめ同じように無次元化して計算すればよい.

以上二つの式を4・2節の境界条件にそって計算する. 吸込み始め, 吸込み終わりより圧縮過程へ移る際, 圧縮終わりより吐出し過程へ移る際の三つの異なった境界条件を前述の二つの式にあてはめて計算すると吸込み始めから吐出し終わりまで連続した気液界面の形状が得られる. 実際の計算では吸込み始めに式(6), (8), (11)を用い, 圧縮途中で $\partial r_x/\partial x$ の符号が変わるところがあるのでそれ以後は式(6), (9), (12)を用いる.

圧縮途中から吐出し過程で異なった気液界面の形状が何種類か得られることが, これはキャリ・オーバ率, ε, 圧力比のパラメータを考慮しているからである.

6. 吸込み, 圧縮, 吐出し過程の圧力変化

気体の圧力変化は3・4節より, 吸込み過程では $p_s/(\rho_w U^2)=1/(2\varepsilon)$, 吐出し過程では $p_d/(\rho_w U^2)=p_d/(\rho_w U^2)$ と無次元化し, この二つの過程では圧力一定となる. 圧縮過程では

$$\frac{p_a}{\rho U^2}=\frac{1}{2\varepsilon}\left(\frac{(r_{x2}/r_a)^2-(r_i/r_a)^2}{(r_x/r_a)^2-(r_i/r_a)^2}\right)$$

のように無次元化する. r_x は圧縮中は変わるのでそれにつれて圧力も変わる. r_{x2} は吸込み終わりの r_x である.

7. 吸込み空気量

吸込み終わりの二次元吸込み空気量 λ_R を

$$\lambda_R=\int_{r_i}^{r_{x2}}\omega r dr$$

とすれば, $U=\omega r_a$ より

$$\frac{\lambda_R}{Ul_2}=\frac{1}{2}\frac{r_a}{l_2}\left[\left(\frac{r_{x2}}{r_a}\right)^2-\left(\frac{r_i}{r_a}\right)^2\right]$$

となり無次元吸込み空気量 $\lambda_R/(Ul_2)$ が求まる.

8. 封液のもれ量

封液が吐出し過程で吐出し口へもれ出す場合についてその量を計算する. 封液が $x=x_4$ でもれ始め, $x=x_5$ でもれが止るとする. $x_4<x<x_5$ では羽根内半径内側へもれているので式(6), (10)は成り立たない. しかし式(5), (7), (9), (12)は成り立つのでこれら三つの式より封液のもれが止る時, すなわち $w_{ra}=0$ になる時の x_5 を求めればよい. 三日月通路の周方向の封液の流量 q_b は

$$q_b=cl_2(1-x^2/\phi^2) \cdots\cdots(16)$$

羽根間通路の周方向の封液の流量 q_c は

$$q_c=(1-\beta)(1-r_i^2/r_a^2)r_a U/2 \cdots\cdots(17)$$

封液の吐出し口へのもれ量 q_L はもれ始めの $(q_b+q_c)_{x4}$ から, もれが止る時の $(q_b+q_c)_{x5}$ を減ずればよい. $x_4<x<x_5$ では q_c は一定である. ゆえに q_L は

$$q_L=\{cl_2(1-x^2/\phi^2)\}_{x4}-\{cl_2(1-x^2/\phi^2)\}_{x5} \cdots\cdots(18)$$

9. 結　果

図2は気液界面の形状を表したものである. 縦軸は羽根のラジアル方向で, $r_x/r_a=0.59$ のところが羽根根元つまり羽根内半径である. $r_x/r_a=1.0$ のところが羽根先端である. 横軸はポートタイミングを表しており, $-1.0<x/\phi<-0.20$ が吸込み, $-0.20<x/\phi<0.45$ が圧縮, $0.45<x/\phi<1.0$ が吐出しの各過程を表している. この図においてキャリー・オーバ率が0%, $\varepsilon=2$, 圧力比 $p_d/p_s=4.19$ の場合には吐出し終わりで気液界面がちょうど羽根根元で終わっている. これがキャリー・オーバがないときの正常運転である. 圧力比がそれよりちょっとでも大きくなると羽根間通路の気体が三日月通路に飛込む異常現象となる. また逆にそれより圧力比がちょっとでも小さくなると封液が羽根内半

径より吐出し口へもれ出してしまう.

図5までに示されている気液界面の形状を実際に観察することは本報と同タイプのポンプでは不可能に近く観察されたものはまだない. 理由は観察する場合は羽根車の側面から見るのであるが, 側気口型と違って観察窓となる側面が覆われていてその部分を取り外しては正常な運転ができないからである. 側気口型のものの実験例が一例(3)あるが, ほぼ理論値と同じような結果が得られている.

図3は, εについては図2と同じでキャリー・オーバ率を0.2%としたときのもので, 正常運転のための限界の圧力比が3.42で, 図2より減少している.

図4はキャリー・オーバ率は図2と同じ0%で, ε=1,2,4,8と変えていったときに, それぞれのεについて正常運転になるための限界の圧力比を求めたものである. εが大きくなると限界の圧力比も大きくなる. 吐出し過程になるとεの違いによる気液界面の形の差がはっきりと現れてくるが, これは封液の加速度が吐出し始めに急激に変化するためである.

図5はε=2.0のときで, 圧力比を4.19から1.0まで変えていったときにキャリー・オーバがどのようになるかみたものである. 圧力比が4.19のときキャリー・オーバ率が0%で圧力比が1.0になると0.6%に増えている. 圧力比の大幅な増減でもキャリー・オーバには影響は少ない. このことは逆にいえばキャリー・オーバのわずかな増減でも圧力比に大きな影響を与えるということである.

図6は各過程の圧力変化をみたものである. 縦軸が無次元圧力で, 横軸が吸込み, 圧縮, 吐出しの各過程である. 圧縮過程途中までは圧力は一定であるが, 途中から圧力が上昇してゆき, 吐出し過程にはいると特別の場合を除き圧力が突如変わる. 圧縮終わりより吐出し始めの圧力が大きいものが逆流圧縮(c・o・f 0%でε=2.0, 4.0, 8.0, c・o・f 0.4%でε=2.0), その逆の圧縮終わりより吐出し始めの圧力が小さいものが過圧縮(c・o・f 0%でε=1.0, c・o・f 0.6%でε=2.0)といわれているものである. 吸込み始めから吐出し終わりまで羽根間通路の気体の圧力変動を測定したものはまだなく, それについては次報で報告する予定である.

図7, 8は正常運転のときに圧力比が変化すると吸

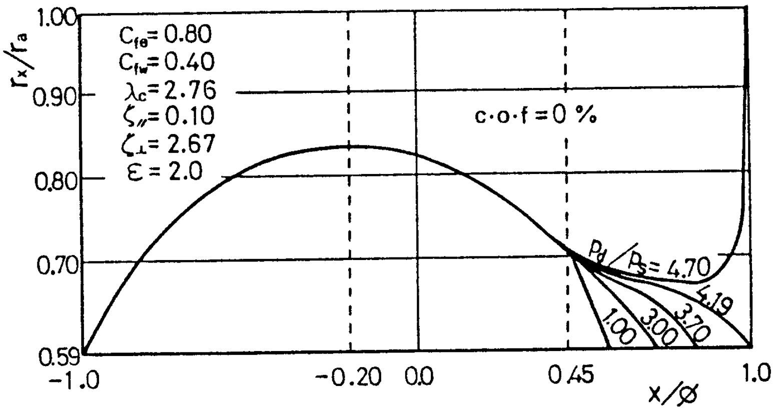


図 2 気液界面の形状

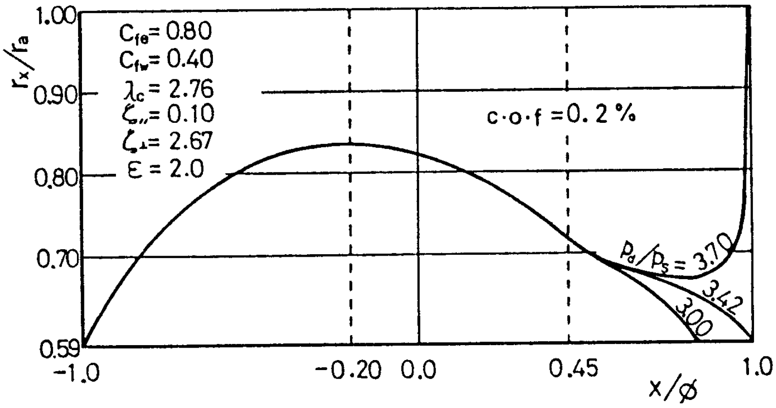


図 3 気液界面の形状

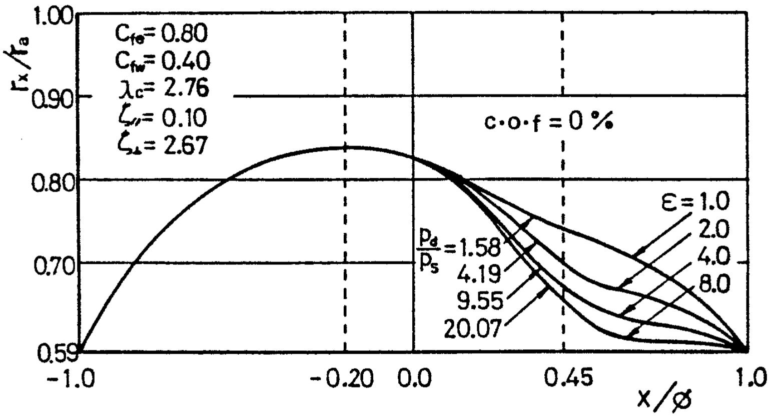


図 4　気液界面の形状

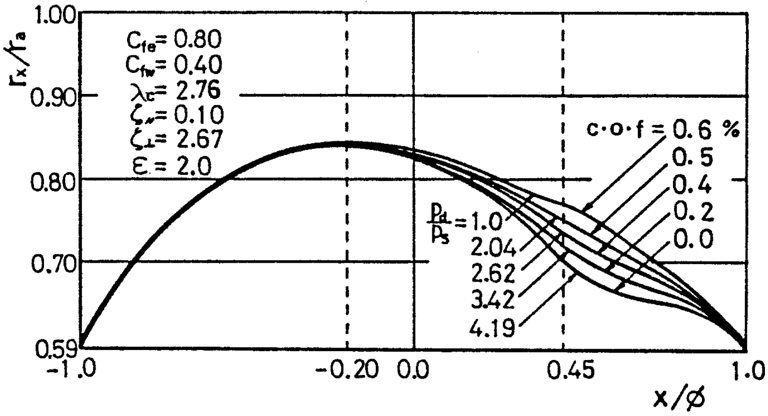


図 5　気液界面の形状

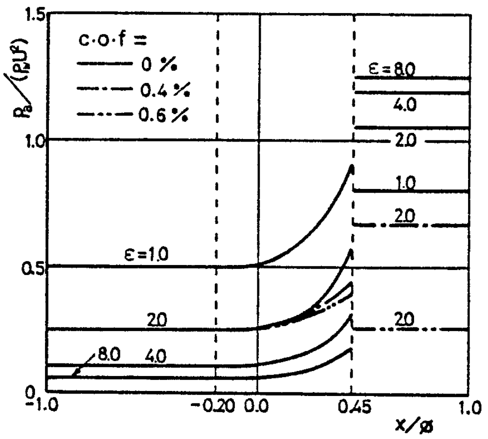


図 6　各過程の圧力変化

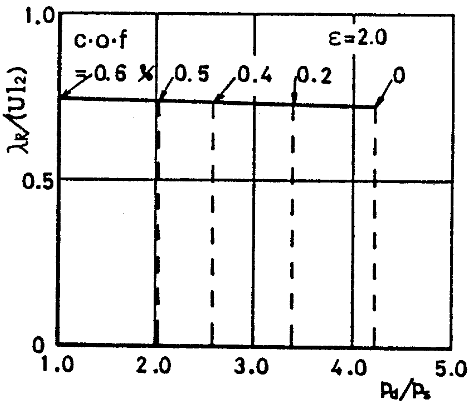


図 7　吸込み空気量と圧力比

込み空気量はどうなるかみたもので縦軸が無次元吸込み空気量，横軸が圧力比である．図7は $\varepsilon=2.0$ 一定のときキャリー・オーバ率が小さくなると吸込み空気量もわずかに減少してゆく（図5参照）．図8はキャリー・オーバ率0％一定で，ε が変化しても吸込み空気量は変わらない（図4参照）．吸込み空気量に影響を与えるのはキャリー・オーバで，圧力比が変化しても吸込み空気量は変わらない．実際の測定例[(4)]では圧力比が増えると吸込み空気量が大幅に減少してゆくが，これはすきまから外へ空気がもれ出しているからである．本報ではすきまからの空気のもれはないとして計算している．

図9，10は吐出し口への封液のもれ量を計算したものである．縦軸が無次元封液もれ量，横軸が圧力比である．図9はキャリー・オーバ0％一定のとき ε が変

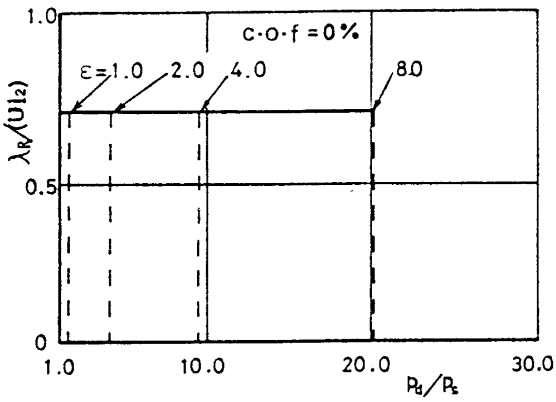


図 8 吸込み空気量と圧力比

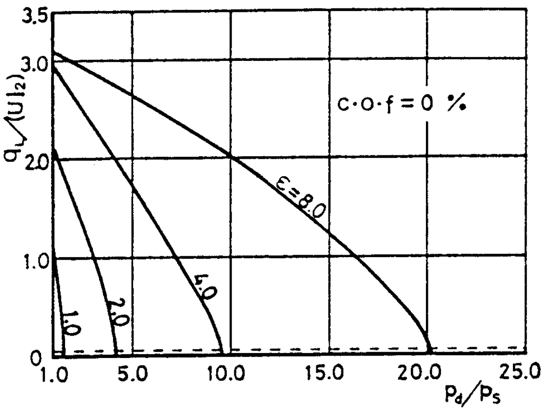


図 9 封液の吐出し口へのもれ量

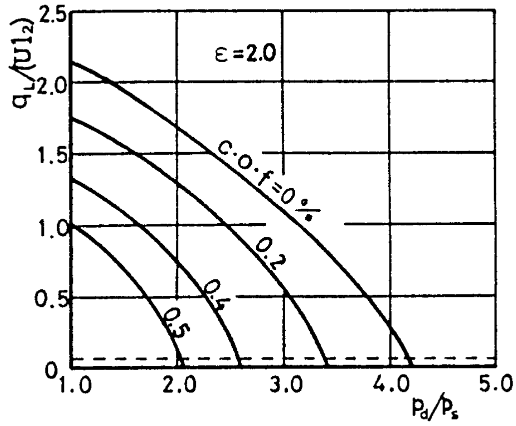


図 10 封液の吐出し口へのもれ量

わるともれ量はどうなるかみたもので，εが一定の曲線では圧力比が小さくなるほど，圧力比が同じところではεが大きいものほど，もれ量は多くなる（図2参照）．図10は$\varepsilon=2.0$一定のときにキャリー・オーバ率が変わるともれ量はどうなるかみたものである．キャリー・オーバ率が一定の曲線では圧力比が小さくなるほど，圧力比が同じところではキャリー・オーバ率が小さいものほどもれ量は多くなる（図2，3の圧力比3.0を参照）．実際には封液補給量にしたがってもれ量一定で運転されているから図9，10においては破線の付近で運転されているわけである．つまり与えられた圧力比によってキャリー・オーバが自動的に調節されているわけである．

10. 結　　言

封液式真空ポンプの異常現象の本質を明らかにしたわけであるが，異常現象が起こらずかつキャリー・オーバなしで吐出し口より封液がもれ出さない運転状態は，相似なポンプについては一つの Drehschnelle についてただ一つの圧力比しか存在せず，それより圧力比が小さくなると封液の一部が吐出し口へもれ出し，そして逆に圧力比が大きくなると羽根間通路の気体が三日月通路へ飛込む異常現象となる．実際のポンプでは異常現象は吐出し過程で起こるが，特にまずい設計をすれば吸込み過程や圧縮過程でも起こすことができる．

普通の運転状態とはそれぞれの圧力比について結果で述べた限界のキャリー・オーバの量に近いところで，わずかに封液のもれ出しがあり，その分だけ封液が補給されているわけである．実際の吸込み空気量は封液の蒸発による分圧によって，さらに圧力比が大きくなると，主としてすきまからのもれによって計算結果よりも減少する．またキャビテーションが起こるとさらに大幅に減少するが，それらについては別問題とする．

付　　録

三日月通路の形状は本報では近似式を用いたが，実在のポンプと比較してもその差はほんのわずかである．

文　　献

（1） 藤田・岡崎，機論，52-479，B（昭61），2607．
（2） Pfleiderer, C., *Die Kreiselpumpen*, 5, Aufl (1961), 588.
（3） Struck, W., *Untersuchungen an Wasserring-Luftpumpen*, Dissertation (Hannover), (1953).
（4） 妹尾・葛西，機論，26-162，B（昭35），217．

討　論

〔質問〕　柳沢　正〔静岡大学工学部〕

液封式真空ポンプについては専門外であり，いささか的外れのお尋ねがあるかもしれないが，以下の点についてご教示いただきたい．

（1）キャリオーバ(c•o)は吐出し終了時の気液界面が羽根半径上にくるとき($r_i < \dot{r}_x < r_a$)に起こると理解してよいか．もしそうでないならば，c•oはどのようなときに起こるか．またもしそうならば，2495ページ右欄下3行めに関連して圧力比が4.19以上でも4.70未満ならばc•oありの正常運転，4.70以上で初めて異常運転（気体の飛込み現象）になると思われるし，図2や図10に関連してc•o•$f>0$で漏れも同時に起こることはないと考える．

（2）図2〜5において気液界面の差異は全封液量の差異に相当すると考えられるが，もし封液量一定の場合には界面はどうなるか．また異常現象との関連はどうか．

（3）2497ページ右欄4行め「すきま」とはどこのすきまのことか，また「そと」とはどこをさすのか．

〔回答〕　（1）キャリオーバ(c•o)について，本論に説明してあるが，もう少しくわしく説明する．

c•oとは前の過程の吐出し終わりに気体がすべて吐出されるわけではなく，その内の一部が今の過程の吸込み始めにくり越されることをいう．したがって，c•oは前の過程の吐出し終了時の気液界面が今の過程の吸込み始めの羽根半径上にくるときに起こると理解すればわかりやすくなると思う．

圧力比が4.19〜4.70では正常運転と誤解されているが，4.19よりわずかでも大きくなると（例：4.191）気液界面の形はすべて4.70と同じようになる．

正常運転でc•oがある場合，正常運転の限界圧力比より少しでも圧力比が大きくなると異常現象となり，逆に小さくなると吐出し口へ封液が漏れ出してしまうこととなる．そして圧力比がさらに下った所でバランスがとれ封液の漏れが止まる．したがって，c•o•$f>0$と漏れは同時に起こってなんら差しつかえない．

（2）封液量の差異には相当しない．気液界面の差異は圧力比およびc•oによって決定される．

封液量一定で運転している場合，圧力比およびc•oの違いにより気液界面には当然ながら差異がでてくる．また異常現象は封液量がどう変わろうが，正常運転の限界圧力比よりわずかでも圧力比が大きくなったときに起こる．

（4）「すきま」とは羽根車内半径とハブ（エアパッセージ）とのすきまをいう．

「そと」とは隣の羽根間通路および吐出し口で，影響が大きいのは隣の羽根間通路である．